

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ГЕНАЛДОНСКОГО СЕЛЯ И КУМУЛЯТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ ЕГО САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

В.Л. Познанин, С.Г. Геворкян\*

*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов МПР–РАН,  
121357, Москва, ул. Вересаева, 15, Россия, poznanin@list.ru*

*\* ФГУП Фундаментпроект, 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, Россия, Sergev99@yandex.ru*

Впервые разработаны и изложены представления о внутреннем строении и функционировании элементов ледово-водокаменного селея, возникшего при срыве ледника Колка в 2002 г. Установлено трехслойное строение потока с центральным положением ледяных блоков оптимального размера, глisciрующих по многослойной водогрунтовой массе, которая при колебаниях давления циркулирует по контактам и порам в верхний, самый подвижный слой субтурбулентной массы. Показано, что статическая инверсионная неустойчивость вертикальной структуры потока при активной циркуляции жидкой массы в разных направлениях сменяется динамической устойчивостью высокоскоростного движения гибкого ледяного тела. Рассчитаны энергетические затраты на срыв грунтовых масс с бортов, на разгон сорванных масс и на внутреннее трение потока. Описан кумулятивный механизм самовоспроизведения селевого потока.

*Инверсия, плотность, динамика, функциональная структура*

### FUNCTIONAL STRUCTURE OF THE GENALDON MUDFLOW AND THE CUMULATIVE MECHANISM OF ITS SELF-REPRODUCTION

V.L. Poznanin, S.G. Gevorkyan\*

*Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements,  
Natural Resources Ministry and RAS, 121357, Moscow, Veresayev str., 15, Russia, poznanin@list.ru*

*\* FGUP Fundamentproject, 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 1, Russia, Sergev99@yandex.ru*

The concept of the internal structure and functioning of the elements of the ice-water-rock mudflow (Kolka glacier's failure, 2002) has been worked out. The three-layered elements of flow with the central position of the ice blocks of optimum size has been established. These icy blocks glide throughout the multilayer water-ground mass. The static instability of vertical flow pattern during the active circulation of liquid mass in different directions is changed by the dynamic stability of the high-speed motion of flexible icy body. The expenditure of energy for the disruption of ground masses from the boards, for the acceleration of the stripped-off masses and for the internal friction of flow has been calculated. The cumulative mechanism of the self-reproduction of mud flow has been described.

*Inversion, density, dynamics, functional structure*

### ВВЕДЕНИЕ

В публикациях, посвященных грандиозной Геналдонской селевой катастрофе 2002 г., весьма сжато излагаются сведения о движении потока, который со скоростью 50–90 м/с прокатился по долине в виде гигантской массы льда, воды и камней, уничтожая на склонах лес и сдирая рыхлые отложения крупными волнами высотой до 100–150 м [Петраков и др., 2004; Рототаева и др., 2005; Черноморец, 2005; Васьков, 2006]. Как в указанных, так и в целом ряде других работ, посвященных Геналдонскому селею 2002 г., приводятся некоторые дополнительные сведения о его движении, полученные по следам катастрофы, но отсутствуют данные о внутреннем устройстве такого потока, его элементах, их взаимном расположении и взаимодействии. Эти данные необходимы для ответа на вопросы о структуре и динамике селевого потока, его энергии, его воздействии

на борта долины, о механизме самовоспроизведения катастрофичности потока.

На основе данных о срыве ледника Колка, его динамической трансформации и механизме формирования высокоскоростного ледово-водокаменного потока можно ответить на часть вопросов, затронутых выше, и тем самым заполнить существенные пробелы в исследовании ледниковых катастроф.

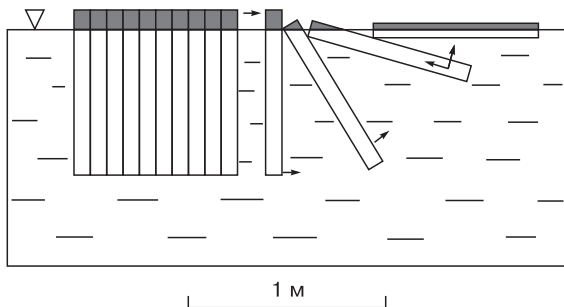
Срыв ледника Колка был вызван потерей сцепления с ложем за счет мощных гидравлических ударов в пористом слое [Познанин, Геворкян, 2008] и представлял собой ускоренное соскальзывание оторвавшейся части ледникового тела (80 млн м<sup>3</sup>) справа налево вниз (с ротационным разрушением селевого очага и опорожнением до 3 млн м<sup>3</sup> воды) вплоть до скользящего удара о левую боковую морену со скоростью более 3 м/с. Разгон ледни-

кового тела по водонасыщенной массе пористого слоя, который выжимался перед фронтом ледника с расходом до 100 тыс. м<sup>3</sup>/с и более, представлял собой стремительное глассирование с устойчивым возрастанием скорости на крутом участке русла до 35–60 м/с. Разгон ледникового тела сопровождался инерционным сбросом поверхностного потока воды вправо в районе моренного треугольника и ледника Майли, а также разламыванием ледника на разномасштабные блоки, чему способствовали неровности русла и потеря опоры на левом борту цирка. Это вызвало плавный поворот огромной массы льда, которая при скорости 60 м/с догнала селевой вал и сорвалась с него в виде грандиозного скользящего удара (без потери скорости), при сохранении глассирующего механизма движения. Ледниковое тело при высокоскоростном скользящем ударе о дно долины приобрело способность к восстановлению внутренней структуры, которая представляла собой гибкий вытянутый объем ледяных блоков, насыщенный циркулирующей по контактам водогрунтовой массой, окруженный вязкой грязекаменной оболочкой и способный сохранять высокоскоростной глассирующий механизм движения потока.

Завершающее звено механизма формирования ледово-водокаменного селя ставит еще один сложный вопрос: почему при скользящем ударе грандиозной массы блоков ледникового тела они не были разбросаны в расширенной части долины и не потеряли высокую скорость? Ответ на данный вопрос можно получить путем анализа поведения некой природной модели, масштаб которой в 10<sup>8</sup> раз меньше ледникового тела.

### СТРОЕНИЕ ТЕЛА СЕЛЕВОГО ПОТОКА

Исследования водных и селевых потоков, насыщенных в разной степени горными породами, а также контактных зон “грунт–вода–лед” с подвижным состоянием жидкости [Флейшман, 1978; Морозов, 1987; Чеверев, 2004] позволяют оценить все разнообразие и сложность структуры воды в различных смесях – подвижных и стати-



**Рис. 1. Устойчивый объем тающих кристаллов льда в озерной воде и потеря устойчивости одного из кристаллов при его отделении от образца.**

ческих. Масштаб проанализированных скоплений воды на контактах с грунтом и льдом, учитывая фазовые переходы, охватывает диапазон от 10<sup>-8</sup> м у прочносвязанной воды до 10<sup>2</sup> м у прорывных паводков и селевых потоков. Поэтому представляется вполне логичным рассмотреть сначала строение ледово-водокаменного потока, а затем оценить, соответствует ли предлагаемое строение реальному процессу движения потока.

В июне 1971 г. на оз. Бол. Хадата (Полярный Урал) В.Л. Познаниным проводились наблюдения за разрушением тающих льдин, состоящих из столбчатых кристаллов.

В качестве объекта наблюдения был взят объем тающего озерного льда (размерами около 1 × 1 × 0,8 м), погруженный в озерную же воду и образованный столбчатыми вертикальными кристаллами, соединенными друг с другом пленками воды. При отсутствии ветра или внешних механических воздействий кристаллы сохраняли плотное сложение, которое периодически нарушалось по периферии льдины при отделении единичных кристаллов (при утолщении водной пленки между кристаллами). Натурные наблюдения показали, что в отсутствие внешних воздействий такое достаточно устойчивое состояние объекта может сохраняться многие часы. Даже при слабом ветре и волнении воды разрушение льдины происходило только снаружи путем отделения единичных столбчатых кристаллов длиной до 0,8 м, их всплывания и выталкивания на поверхность давлением воды (рис. 1).

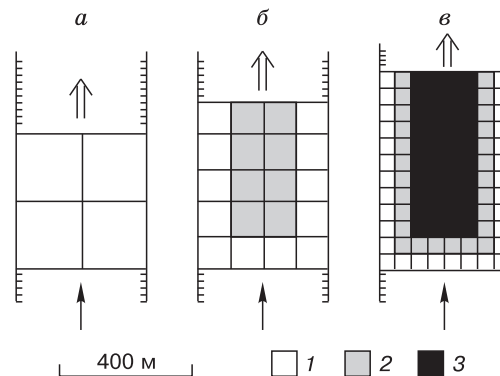
Иная картина наблюдалась в месте истока реки из оз. Бол. Хадата (здесь при глубине реки более 1 м скорость поверхностного течения на расстоянии до 50 м от истока составляла 0,7–1,0 м/с, а поверхность воды приобретала волнообразный характер за счет турбулентности потока). В нескольких наблюдаемых случаях западный ветер подгонял к истоку реки льдины разного размера, состоящие из таких же столбчатых кристаллов льда, соединенных водными пленками. Вынос таких льдин в реку и их разгон также сопровождался отделением единичных кристаллов. При дальнейшем возрастании скорости движения льдин интенсивность отделения столбчатых кристаллов увеличивалась. Так, от краев льдин отделялось уже по 3–5 и более столбчатых кристаллов, которые, падая на поверхность воды в непосредственной близости от льдины, временно препятствовали ее дальнейшему разрушению.

Наблюдения, проведенные на Полярном Урале в июне 1971 г., позволяют сегодня несколько иначе воспринимать картину разрушения тающих льдин из столбчатых кристаллов. Во-первых, отделение ледяных кристаллов осуществлялось только по краям, следовательно, чем дальше от края, тем выше устойчивость совокупности кри-

таллов. Во-вторых, отделившиеся кристаллы временно блокировали дальнейшее разрушение льдин. В-третьих, чем выше скорость потока воды, тем быстрее наступало некое подобие динамического равновесия, так как упавшие горизонтально кристаллы защищали те, что остались в вертикальном положении.

Рассмотренный гляциальный объект относится к эталонному уровню организации вещества литосферы, ледяные блоки Колки – к детальному уровню организации, а сам ледник – к локальному [Познанин, 2003; Познанин и др., 2006]. Учитывая иерархичность данных объектов и используя основные положения системного анализа, представляется возможным оценить устойчивость и поведение ледяных блоков разного размера при их глиссировании по крутому участку ( $20^\circ$  и более) для получения картины плотности упаковки по скальному руслу заданной ширины (400 м). Часть ледникового тела, разделенная условно на четыре одинаковых блока с плановыми размерами  $200 \times 200$  м (рис. 2), при глиссировании по руслу обязательно выстроится в цепочку одинарных блоков за счет неровностей и колебаний уклонов. Такие блоки характеризуются максимальной неустойчивостью планового положения при движении. Если каждый из рассмотренных блоков условно разделить еще на четыре равные части, то (при их общем числе 16) движение сконцентрируется в виде по крайней мере двух цепочек, т. е. устойчивость компоновки блоков  $100 \times 100$  м повысится (см. рис. 2, б). Дальнейшее условное деление блоков ( $50 \times 50$  м,  $25 \times 25$  м) будет сопровождаться повышением устойчивости их компоновки, но до некоторого предела, определяемого критическим размером (см. рис. 2, в).

Задача определения критического размера ледяных блоков для Геналдонского селя, скорее всего, не поддается теоретическому решению. Однако этот размер удастся определить по фактическим размерам кусков льда, “впечатанных” в борта селевого русла в зоне транзита ледово-водокаменного селя (см. [Черноморец, 2005, рис. 5.2]). На приведенных снимках размеры ледяных блоков составляют примерно  $20 \times 30 \times 50$  м, т. е. критический объем их, по-видимому, близок к  $25\text{--}30$  тыс. м<sup>3</sup>. Учитывая, что в краевых зонах потока вероятность дробления блоков возрастает, а в центральных – уменьшается, причем внешняя зона дробления защищает внутреннюю функциональную часть потока, можно предположить, что именно в ней сосредоточены оптимальные, близкие к функционально-динамическому равновесию потока блоки размером как минимум вдвое больше. Если данные рассуждения верны, то средний критический размер ледяных блоков должен составлять около  $50\text{--}60$  тыс. м<sup>3</sup>, или около 40 м в поперечнике (см. рис. 2, в). Представленная схема,



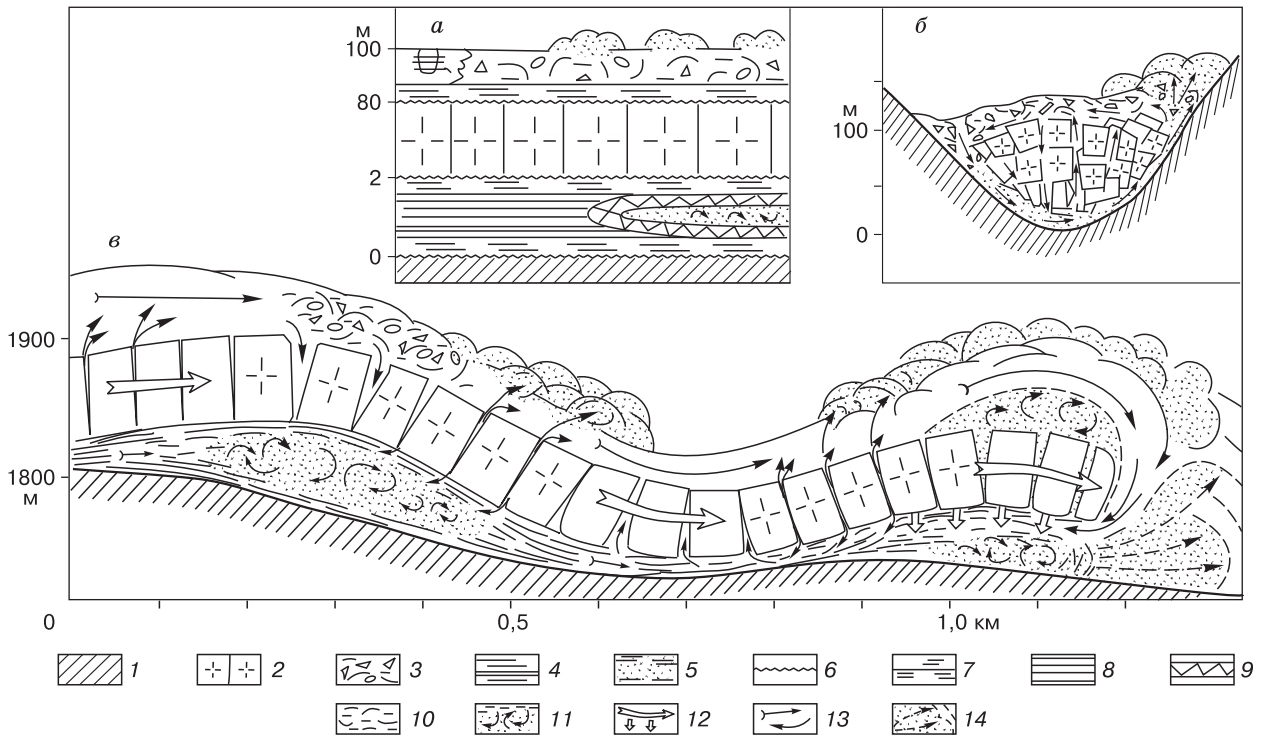
**Рис. 2. Схема-план возрастания устойчивости ледяных блоков (а–в) при ускоренном движении по скальному руслу с дроблением блоков (а, б) до критического размера (в).**

1 – неустойчивые блоки; 2 – умеренно устойчивые; 3 – максимально устойчивые блоки.

по сути, отражает наиболее устойчивую динамическую структуру – оболочечную, которой должно соответствовать определенное строение тела селевого потока.

Согласно разработанной нами схеме, тело ледово-водокаменного селя имеет трехслойное строение (рис. 3, а). Снизу на грунтовом основании залегает маломощный (около 2 м) слой, имеющий сложное строение. Он состоит из нескольких слоев с разными свойствами: вязкого, субламинарного, ламинарного, буферного, субтурбулентного и турбулентного, представленного на рис. 3, а в виде плоской вытянутой линзы. В данном перечне следует отметить наличие переходных (промежуточных) слоев или подслоев, которые отражают смену свойств на контактах между основными слоями. Так, на контакте с дном существует по крайней мере четыре типа микрослоев-пленок: прочносвязанная, рыхлосвязанная, адсорбционная и осмотическая виды вод (на рис. 3 не изображены в силу их чрезвычайно малой толщины  $10^{-7}\text{--}10^{-8}$  м).

Вязкий подслой характеризуется линейным распределением продольных скоростей по глубине и ламинарным режимом движения с постоянным расходом и числом Рейнольдса [Башкиров, 1966; Морозов, 1987]. Выше него расположены субламинарный и ламинарный слои с характерным нелинейным распределением скоростей по глубине. Переход от ламинарного слоя к турбулентному ядру (линзе – в нашем случае) осуществляется путем разрыва границы между ламинарным и турбулентным слоями и возникновения здесь так называемого буферного слоя с нестабильным по величине и направлению распределением скоростей. Именно эта граница является областью зарождения вихрей. Особое внимание следует обратить на “оболочечное” строение турбулентного ядра, свободно перемещающегося в многослойной



**Рис. 3. Состав, строение и динамика ледово-водокаменного потока:**

*a* – схема вертикального инверсионного строения селя; *б, в* – функциональная и динамическая структура селя в поперечном и продольном сечениях потока соответственно; 1 – материал русла и бортов; 2–5 – состав потока: 2 – ледяные блоки основного глиссирующего тела селя, 3 – ледово-водокаменная селевая масса, 4 – водогрунтовая смесь с ледяным крошечком, 5 – воздушно-ледово-водогрунтовая пульпа внутренних линз и внешних выбросов; 6–11 – структурные слои: 6 – вязкий, 7 – субламинарный, 8 – ламинарный, 9 – буферный, 10 – субтурбулентный, 11 – турбулентные ядра (линзы); 12 – векторы скорости ледяного гибкого тела; 13 – векторы скорости селевой массы; 14 – выбросы пульпы при фонтанировании и ударах лобовой волны селя.

среде и защищенного буферной оболочкой. Сама многослойная среда насыщена частицами грунта и кристаллами льда, концентрация которых меняется в процессе движения селя.

Второй слой селевого потока представлен скоплением подвижных ледяных блоков, образующих основную по объему часть селя – около 80%. Ледяные блоки залегают на многослойной жидкой среде и контактируют с ней через вязкий слой (см. рис. 3, *a*). Между вязким слоем и льдом существуют как минимум три микрослоя: квазижидкая пленка, адгезионный и когезионный слои [Маэно, 1988; Савельев, 1991].

Предложенная схема строения слоя из ледяных блоков в действительности нарушается за счет различий в размерах, ориентировке, взаимном расположении и извилистости границ. Наличие крупных зазоров, неровностей на границах, сколов и других изъянов в форме ледяных блоков не просто нарушает представленную идеализированную схему (см. рис. 3, *a*), а обуславливает повышенную скважность (пористость, пустотность) слоя, который заполнен подвижной водогрунтовой массой нижнего и верхнего слоев.

Третий, верхний слой занимает до 20% объема селевого тела и представлен динамической смесью воды, горных пород, ледяных обломков (крошева) и зажатого воздуха. Этот слой контактирует с неровной поверхностью ледяных блоков через два промежуточных слоя: вязкий подслой на поверхности льда и следующий за ним субламинарно-ламинарный слой. Последний слой представляет собой переходное состояние (с нелинейным распределением скоростей) к слаботурбулизованной селеподобной массе, что позволяет характеризовать режим движения этого слоя как субтурбулентный. В данном случае отличие от “обычной” селевой массы с турбулентным режимом движения обусловлено наличием ледяных включений (кусков и крошева льда), и чем их больше по объему, тем менее бурным будет движение среды.

Завершая описание схемы строения тела селевого потока необходимо указать на особый тип распределения средней плотности слоев снизу вверх: нижний слой имеет плотность 1100–1200 кг/м<sup>3</sup>, средний – 900–1000 кг/м<sup>3</sup>, верхний – 1500–1700 кг/м<sup>3</sup>. Ясно, что такая структура будет неустойчивой, поскольку она близка к инверсионной.



Инверсионная структура может сохраниться только при наличии постоянного силового воздействия, направленного по оси движения селевой массы по уклону русла речной долины (см. рис. 3, б).

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА УЛЬТРАСЕЛЕВОГО ПОТОКА

Настоящий раздел посвящен функциональной структуре Геналдонского селя. При этом, говоря о функциональной структуре, мы имеем в виду закономерности взаимодействия между составными частями селевого потока.

Несмотря на прямолинейность троговой долины, по крайней мере от языка Майли до Кармадонских ворот, т. е. на расстоянии около 12 км, она характеризуется наличием участков расширения и сужения (до 1,5 раз) и незначительным колебанием уклона русла реки (при среднем уклоне 0,08).

На участке скользящего удара ледово-водокаменной массы ниже ледника Майли (где фактически сформировалось подвижное устойчивое тело с глиссирующим механизмом высокоскоростного (60 м/с) движения и катастрофической величиной расхода около 2 млн м<sup>3</sup>/с) расширенный участок долины сменяется V-образным поперечным сечением площадью до 40 тыс. м<sup>2</sup> (см. рис. 3, б). Лобовая волна потока свободно прошла в измененный по морфологии участок долины, а тело селевого потока испытывало боковое давление бортов. Под действием этого давления ледяные блоки основного тела (динамического стержня селя) сжимались, при этом наверх и по периферии выдавливалась грязекаменная масса с мощным выбросом вдоль правого борта вещества пульпы (воздушно-каменно-ледово-щебнистой массы). Следы ударов пульпы (со скоростью до 200–300 м/с) отчетливо видны на цветных фотографиях в публикациях [Черноморец, 2005; Никитин и др., 2006]. Высота поверхности селя возрастает при этом до 160–170 м (см. рис. 3, в, участок 0–0,2 км).

На приведенном участке русла отчетливо проявляются особенности функциональной структуры селя: нижний слой потока испытывает максимальное давление и имеет минимальную скорость, причем часть его вещества стремительно выдавливается вверх по контактному зонам между ледяными блоками и дополняет верхний слой селевой массы, движущейся с максимальной скоростью. Но уже на следующем участке русла (0,2–0,5 км) увеличение уклона приводит к инерционному приподниманию ледяного слоя и резкому падению давления в нижнем ламинарном слое, где возникает разреженная турбулентная линза. Но именно здесь проявляется способность потока к саморегулированию. Так, изгибание ледяного тела открывает зоны контактов между блоками, куда стремительно врывается часть селевой массы с повер-

ности потока, которая через 5–10 с сжимается ледяными блоками и с огромной скоростью выбрасывается частично в верхний и нижний слои.

Скорость движения водогрунтовой массы по зоне контактов между блоками можно оценить из следующих соображений. При плановом поперечнике блоков 40–50 м (см. рис. 2, в) и их высоте 60–70 м зоны раскрытия контактов между ними не превышают 5–10 м, причем эти зоны возникают и закрываются в течение 1 с в силу высокоскоростного движения самого потока. Следовательно, водогрунтовая масса, затягиваемая или выбрасываемая по длине зоны любого из относительно ровных контактов, движется со скоростью 60–70 м/с. При таких “закрытических” скоростях вода активно кавитирует (т. е. имеет место “холодное кипение”) и интенсивно разрушает обломки горных пород, превращая их в дресву и щебень. Повидимому, этот процесс при движении селя имеет массовый характер, поскольку крупные обломки обвалных тел в ледниковом цирке диспергировались в зоне транзита и аккумуляровались у Кармадонских ворот в виде мелкозема. Поэтому становятся понятны факты акустических выбросов мелкозема по периферии селевого потока. Один из примеров такого выброса показан в интервале 0,5–0,6 км (см. рис. 3, в).

На следующем ровном участке русла (0,6–0,8 км) ледниковое тело сдавливает нижний ламинарный слой, но при этом открываются контакты на нижней поверхности блоков. Растущее давление приводит к вертикальному выдавливанию водогрунтовой массы, которая при смыкании контактов на следующем участке (0,8–1,0 км) выбрасывается как вниз, так и вверх, где уже сформировалась особая зона лобовой волны (фронта потока).

Лобовая волна селевых потоков почти всегда окутана мощными клубами пульпы, которые непрерывно меняют свои размеры и очертания. При этом периодически вперед выбрасываются (со скоростью до 300 м/с) мощные фонтаны вещества пульпы, содержащей иногда обломки горных пород до 30 см в поперечнике.

Во время движения лобовая волна селевого потока периодически обрушается. Однако она быстро восстанавливается за счет захвата грунтовых масс с бортов долины, дополнительных масс речной и талой воды при частичном таянии льда вследствие фрикционных эффектов и теплообмена с прогретым рыхлым материалом со склонов.

Рост высоты лобовой волны с 50–70 до 150–170 м с периодическими ее обрушениями неизбежно вызывает в гибком теле ледяных подвижных блоков (как основном стержне селевого потока) формирование волн длиной около 1 км (см. [Никитин и др., 2006, с. 165, рис. 1]). Движение двух самых крупных волн осуществлялось по разным траекториям, что обусловлено изменением

морфологии русла и склонов долины. Фронтальное обрушение вперед селевой массы (с некоторым ее торможением о дно долины) определяет скоростное приподнимание поверхности селя и формирование волн, движущихся вперед по ходу потока. Волновое движение потока имело вид “руслового раскачивания” селевой массы с переменным перекосом поверхности до  $35-40^\circ$ .

### ЭНЕРГИЯ СЕЛЕВОГО ПОТОКА

Специальный анализ энергетического состояния селевого потока дает несколько интересных результатов. Суммарная энергия схода селя от зоны формирования до зоны аккумуляции составляет около  $10^{15}$  Дж при общей массе вещества  $10^{11}$  кг и перепаде высот 1000 м. Оценка величины потенциальной энергии сделана в рамках точности (10–15 %) опубликованных данных [Петраков и др., 2004; Черноморец, 2005]. Кинетическая энергия потока в том же интервале составляет всего  $1,8 \cdot 10^{14}$  Дж при той же массе и скорости потока 60 м/с.

Для средней скорости потока исследователи приводят разные значения. Преобладает значение около 50 м/с [Черноморец, 2005], нами получено 60 м/с, а И.М. Васьков [2006] дает максимальный диапазон параметра – 75–90 м/с. Вместе с тем даже экстремальное значение скорости приводит к возрастанию кинетической энергии только до  $4 \cdot 10^{14}$  Дж. Следует отметить при этом, что потенциальная энергия превосходит кинетическую на 60–80 % и более.

В зоне формирования ледово-водокаменного потока на участке долины ниже ледника Майли масса потока достигала 90 млн т, а скорость при скользящем ударе – 60 м/с, что дает величину кинетической энергии селя около  $1,61 \cdot 10^{14}$  Дж. Учитывая необычайно высокую подвижность тела потока и относительную стабильность уклона дна долины, можно предположить, что перед зоной аккумуляции скорость также составляла 60 м/с. При массе селевых накоплений 115 млн т величина кинетической энергии достигает  $2,09 \cdot 10^{14}$  Дж. Разница энергий  $\Delta E = 0,48 \cdot 10^{14}$  Дж расходуется в основном на срыв грунтовых масс с бортов (эрозию) и разгон этих масс до средней скорости селя. Первая составляющая определяется как произведение разницы объемов  $115 \cdot 10^6 - 90 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> на среднее значение прочности на сдвиг супесчано-суглинистых щебнистых отложений разного генезиса на склонах (до 0,1 МПа), что дает около  $0,2 \cdot 10^{13}$  Дж. На разгон сорванных масс до средней скорости селя затрачивается  $0,44 \cdot 10^{14}$  Дж, что в сумме с предыдущим значением составляет  $0,46 \cdot 10^{14}$  Дж. Разница энергий ( $\Delta E = 0,48 \cdot 10^{14}$ ) за вычетом полученного значения дает  $0,02 \cdot 10^{14}$  Дж, т. е. 2 млн МДж, что и составляет суммарные затраты на трение.

Полученные затраты энергии на все виды трения в гигантском селевом потоке ничтожно малы, так как соответствуют энергии, выделившейся при таянии всего  $6500$  м<sup>3</sup> льда.

Для полноты картины целесообразно привести сведения о тепловой составляющей процесса, в который вовлечен огромный объем эродированного потоком грунта ( $25$  млн м<sup>3</sup>). По нашим оценкам, можно принять, что за три минуты движения потока реально могла быть выделена лишь половина общего количества тепла, пошедшего на таяние льда. В таком случае, исходя из величины удельной теплоемкости грунтов на склонах ( $3,4$  МДж/(м<sup>3</sup>·К)) и принимая во внимание достаточно высокую температуру грунта (около  $6^\circ\text{C}$  в сентябре), нетрудно оценить общее количество талой воды как добавки к селевой массе. Она составляет около 800 тыс. м<sup>3</sup>, т. е. немногим более 7 % от общего количества воды при срыве Колки ( $11$  млн м<sup>3</sup>).

### КУМУЛЯТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КАТАСТРОФИЧНОСТИ СЕЛЕВОГО ПОТОКА

Большое расхождение в оценках потенциальной и кинетической энергий потока на участке в 12 км невольно наталкивает на мысль об особой роли центрального стержня селя из ледяных блоков, которые движутся быстрее, чем фронтальная часть потока, испытывающая сопротивление грунтовых масс, водной и воздушной среды. Некоторое различие в скоростях быстро накапливается. При общем почти прямолинейном движении потока разница в скоростях приводит к периодическим обрушениям лобовой волны потока с захватом значительных объемов воздуха (около 1 млн м<sup>3</sup>). Это стимулирует волнообразное движение селя в самой устойчивой центральной части, поддерживаемой в местах расширений долины оболочкой краевых блоков. Такое волновое движение потока с максимальной скоростью в центральной части селя обуславливает накопление внутренних напряжений в ледяном стержне и рост высоты лобовой волны. Фронтальная часть потока, перемещающегося в виде синусоиды с длиной волны 700–800 м (см. рис. 3, в), периодически обрушается. При этом возникают кумулятивные удары лобовой волны и происходит схлопывание разреженных (воздушных) линз – объемов с оптическими боковыми выбросами пульпы. Следы описанных эффектов отчетливо проявляются в виде клубящихся выбросов и ударных воздушных волн. На участке прямого русла могло проявиться более 10 мощных кумулятивных ударов лобовой волны с энергией каждого  $0,5 \cdot 10^{14} - 0,8 \cdot 10^{14}$  Дж. Отсутствие фиксации сейсмостанциями этих ударов объясняется тем, что они протекали в нижней части селевого тела на контакте с рыхлыми, а не скальными грунтами, т. е. эти удары гасились взаимодействующими средами.

## ВЫВОДЫ

1. Высокоскоростное движение ледово-водокаменного селя (60 м/с) характеризуется повышенной устойчивостью за счет оболочечного строения потока, в центральной части которого (гибком ядре) концентрируются ледяные блоки оптимального размера объемом около 50 тыс. м<sup>3</sup>, окруженные цепочками менее крупных блоков, которые защищают динамическое ядро селя от внешних воздействий.

2. По вертикали селевой поток имеет трехслойное строение. Снизу на грунтовом основании залегает многослойная, но маломощная (до 5 %) масса различных по динамическим свойствам водогрунтовых слоев, на которых расположен второй – основной по объему (80 %) – слой подвижных ледяных блоков. Именно этот слой, имеющий большой импульс, и обеспечивает устойчивость потока. Верхний слой, занимающий около 15 %, представлен селевой массой растворенного воздуха, воды, ледяного крошева и горных пород – он обеспечивает связь с нижним слоем. Однако различия в плотности вещества слоев определяют инверсионную неустойчивость такой структуры в исходном состоянии.

3. Исходная инверсионная неустойчивость строения потока сменяется при движении устойчивостью селя за счет активной миграции, перетекания и выдавливания водогрунтовой массы по контактам между ледяными блоками, по порам и кавернам в любом направлении. Циркуляция массы играет роль главного компенсатора колебаний, скачков давления, ударов и разворотов любых ограниченных перемещений ледяных блоков. Водогрунтовая многослойная масса нижнего яруса (со скоростью до 10 м/с) испытывает гигантские перепады давления, периодически по порам выдавливается вверх, где движущийся со скоростью более 60 м/с слой субтурбулентной селевой массы определяет размеры и внешнюю форму основного тела.

4. Энергетическое состояние потока в зоне транзита характеризуется огромными различиями между потенциальной и кинетической энергиями селя – 80 и 20 % соответственно, что обусловлено ламинарной структурой потока в целом. Кинетическая энергия селя при средней скорости движения потока 60 м/с возрастает вниз по руслу с  $1,61 \cdot 10^{14}$  до  $2,09 \cdot 10^{14}$  Дж за счет ее накопления при эрозионном срыве грунтовых масс с бортов и разгона этих масс до средней скорости селя. Затраты кинетической энергии потока на трение ( $2 \cdot 10^{12}$  Дж) эквивалентны таянию всего 6,5 тыс. м<sup>3</sup> льда, что в 120 раз меньше теплового воздействия на лед захваченных потоком масс грунта с температурой +6 °С.

5. Огромная разница между потенциальной и кинетической энергиями потока ( $0,8 \cdot 10^{15}$  Дж) обу-

словливает действие кумулятивного механизма самовоспроизведения катастрофичности селевого потока. Указанный механизм представляет собой периодические кумулятивные удары лобовой волны селя высотой 150–170 м с энергией  $0,5 \cdot 10^{14}$ – $0,8 \cdot 10^{14}$  Дж. Это является результатом динамического давления гибкого ледяного ядра на фронтальную часть потока: избыток потенциальной энергии периодически выбрасывается в процессе движения потока порционно – в виде концентрированных силовых воздействий на русло и борта долины.

## Литература

- Башкиров Г.С.** О распределении скоростей по вертикали турбулентного потока // Гидравлика и гидротехника, 1966, вып. 4, с. 16–20.
- Васьков И.М.** Возможные признаки и критерии образования катастрофических обвалов // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. Междунар. конф. (Владикавказ; Москва, 23–26 июня 2004 г.). Владикавказ, Олимп, 2006, с. 80–91.
- Маэно Н.** Наука о льде. М., Мир, 1988, 231 с.
- Морозов А.П.** О профиле скоростей в зоне взаимодействия турбулентного ядра потока и пограничного слоя // Динамика русловых потоков. Л., ГИМИЗ, 1987, № 98, с. 134–137.
- Никитин М.Ю., Хуггел К., Шварц М. и др.** Дешифрирование дистанционных материалов для реконструкции процесса обрушения ледника Колка // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. Междунар. конф. (Владикавказ; Москва, 23–26 июня 2004 г.). Владикавказ, Олимп, 2006, с. 156–171.
- Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 29–39.
- Познанин В.Л.** Уровни организации вещества литосферы // Глобалистика: Энциклопедия / Гл. ред. И.И. Мазур, А.Н. Чумаков. М., Радуга, 2003, 1052 с.
- Познанин В.Л., Геворкян С.Г.** Гидравлический механизм отделения тела ледника Колка от ложа: начало срыва – кинетика и гравитация // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 87–96.
- Познанин В.Л., Миронов Н.А., Вдовина О.К.** Теоретические основания пространственной дифференциации геологической среды для построения картографических моделей экзогенных геологических процессов // Инж. геология, 2006, № 5, с. 17–22.
- Ротогаева О.В., Котляков В.М., Носенко Г.А. и др.** Исторические данные о подвижках ледников на Северном Кавказе и Кармадонская катастрофа 2002 г. // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 136–145.
- Савельев Б.А.** Гляциология. М., Изд-во Моск. ун-та, 1991, 288 с.
- Флейшман С.М.** Сели. Л., Гидрометеиздат, 1978, 312 с.
- Чеверев В.Г.** Природа криогенных свойств грунтов. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
- Черноморец С.С.** Селевые очаги до и после катастроф. М., Науч. мир, 2005, 184 с.

Поступила в редакцию  
23 апреля 2008 г.